

АНАЛИЗ НЕКОТОРЫХ ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИОННО-ПЛАЗМЕННОГО ПОКРЫТИЯ (TiZr)N НА ЛОПАТКАХ РОТОРА КОМПРЕССОРА ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ ТВ3-117

К. А. КОРСУНОВ, Е. А. АШИХМИНА

Восточноукр. нац. ун-т им. В. Даля. 91034, г. Луганск, кв. Молодежный, 20, а. E-mail: uni@snu.edu.ua

Рассмотрены результаты проведенных испытаний по оценке износостойкости лопаток ротора компрессора вертолетного двигателя ТВ3-117 с ионно-плазменным покрытием (TiZr)N, ранее использовавшимся только в инструментальном производстве. Испытания на компрессорных лопатках проведены в условиях, близких к условиям эксплуатации вертолетного двигателя при взлетном режиме. Результаты испытаний покрытия на стойкость к коррозии в воздушно-морской атмосфере соответствуют в среднем девяти баллам по десятибалльной шкале. Сделано предположение, что скорость эрозии покрытия зависит от его микротвердости и температуры воздуха в компрессорном узле двигателя. Для описания и анализа этих зависимостей применялся математический метод выравнивания (метод наименьших квадратов). Квадратичная функция наиболее точно описывает практические результаты. Расчетная квадратичная кривая второго порядка хорошо коррелирует с опытной кривой, отражающей зависимость скорости эрозии от микротвердости. Полученная рабочая модель обеспечивает возможность проведения дальнейших расчетов сроков службы лопаток в различных интервалах температур, т. е. оценки надежности авиационной техники. Библиогр. 14, табл. 4, рис. 3.

Ключевые слова: ионно-плазменное покрытие (TiZr)N, скорость эрозии, микротвердость, лопатка ротора компрессора, увеличение срока службы двигателя ТВ3-117, метод аналитического выравнивания, дисперсионный анализ

Лопатки ротора компрессора вертолетного двигателя ТВ3-117 – наиболее нагруженные детали, подвергающиеся действию статических, динамических и циклических нагрузок, поэтому их изготавливают из титановых сплавов, не уступающих другим легким сплавам по жаростойкости, стойкости к коррозии и эрозии.

Однако, при эксплуатации вертолета Ми-24 (условия песочных почв), особенно в режиме зависания вертолета над поверхностью земли, создается абразивная водно-воздушная среда высокого давления (более 4,0 атм) в воздушном тракте узла компрессора двигателя. Затягиваемые частицы пыли, различного размера и геометрической формы, под давлением воздуха ударяются о поверхность пера лопатки ротора компрессора, создавая локальный микроудар и впоследствии вызывая микротрещины, сколы, задиры, борозды, вырывы и другие дефекты. В связи с этим происходит сильный эрозионный износ лопаток и мощность двигателя может падать на 23...25 %. Степень и характер эрозионного износа зависят от дисперсного состава и количества пыли, засасываемой в двигатель [1, 2]. Для дальнейшей эксплуатации вертолетного двигателя опасны следующие дефекты на лопатках: фреттинг-коррозия на хвостовой части (рис. 1, а) и эрозионный износ по перу (рис. 1, б), которые приводят к постепенному

разрушению материала, т. е. снижению надежности техники и возникновению опасности помпажа двигателя.

Также при использовании титановых сплавов в конструкции компрессора двигателя появляется риск возникновения «титановых пожаров». Наличие трения в возмущенном потоке воздуха (температура выше 300 °С) приводит к быстрому возгоранию титана, вследствие чего прожигаются все конструкционные материалы, в том числе жаропрочные сплавы в двигателе [1, 3].

В связи с вышеизложенным, для повышения стойкости к химическому и механическому воздействиям на лопатки ротора компрессора, изготовленных из сплавов на основе титана, применяют следующие виды защиты:

- очистка топлива и воздуха от примесей;
- установка пылезащитного оборудования на входное устройство двигателя;
- создание новых сплавов с высокими технико-эксплуатационными показателями;
- нанесение защитных покрытий.

Последний пункт наиболее перспективен, так как не ведет к удорожанию топлива, не требует создания громоздких конструкций и применения дорогих материалов. Нанесение защитных покрытий на лопатки возможно различными способами. По показателям коррозионной стойкости ϕ (балл) и эрозионной стойкости D (балл) предпоч-



Таблица 1. Защитные покрытия для деталей авиационных двигателей и инструмента [4–6]

№ п/п покрытия	Покрытие	Способ нанесения	Материал покрытия	Деталь/материал	Эксплуатационные показатели T , °C; ϕ ; D , балл	Толщина, мкм
1	Никель-кадмиевое	Электрохимический (гальваническая ванна)	Никель, кадмий	Лопатка/15X12H2МВФАБ-Ш; 13X11H2B2МФ	350; 2; 1	12...20
2	Вакуумное ионно-плазменное	Ионно-плазменный конденсационный («Булат», «Пуск», МАП-1)	TiN; ZrN; TiN-TiAlN	Лопатка/ВТ-20, ВТ3-1, 14X17H2, ВК8, ВТ-6С	250...400; 1...2; 2...3	0,05...12,00
			TiC-TiCN-TiN; TiN-TiAlN; TiAlN-TiAlSiN; TiFeN-TiFeSiN; TiC; TiN-TiMoN; TiCN-TiZrN-TiN; TiN-TiZrN-TiN; TiN-TiZrN; ZrC	Режущий инструмент/У8, Р6М5, Р9К9, Т15К6, У10, У13	250...400; 2; 4	
			TiC; ZrC	Авиационный агрегат/САП-2; ВТ3-1	250...400; 2; 3	
3	Металлокерамическое	Детонационный	ВП-АФЦ Н-ВП-АФЦ1 с подслоем никеля; WC-C (BK-15)	Лопатка/легированная сталь	400...450; 3; 1	80...100

Примечание. Недостатки покрытий: № 1 — наводораживание материала, низкие эксплуатационные показатели и технологичность; № 2 — дорогостоящее оборудование, низкая производительность; № 3 — большие габариты деталей, неравномерность покрытий, низкая эрозионная стойкость.

тительнее вакуумные ионно-плазменные покрытия (табл. 1).

Целью данной работы является исследование и анализ физико-технических показателей ионно-плазменного многофункционального покрытия типа (TiZr)N, ранее применяемого только для инструмента и предложенного для защиты компрессорных лопаток из титанового сплава ВТ-8 вертолетного двигателя ТВ3-117.

Напыление наносили на всю поверхность лопатки, т.е. на перо и замочную часть, в два слоя (толщина 5,0...5,5 мкм) на установке «Булат-6». Параметры режимов нанесения покрытий представлены в табл. 2. Первый слой покрытия формировался поочередным бомбардированием по-

верхности лопатки ионами титана и циркония в разреженной среде азота. В процессе нанесения первого слоя одновременно идет очищение поверхности и ее упрочнение частично диффундирующими в поверхность основы соединениями ZrN, TiN. Второй слой покрытия имеет более сложный состав, включающий упрочняющие фазы на основе тугоплавких соединений ZrN, TiN, (TiZr)N, которые приостанавливают процесс разрушения материала основы лопатки, вызванный химическим и механическим влиянием среды при эксплуатации двигателя. Состав покрытия катода, об. %: 20 Zr; 80 Ti.

Данные исследований на коррозионную стойкость, изменения скорости эрозии и микротвер-

Таблица 2. Режимы нанесения ионно-плазменного покрытия типа (TiZr)N

Этап напыления	Ток ускоренного ионного потока $I_{и}$, В	Напряжение ускоренного ионного потока $U_{и}$, В	Ток дуги испарителя $I_{к}$, А	Напряжение разряда $U_{к}$, кВ
Ионное травление (давление азота 10^{-1} Па)	3	250	90	1,8
Напыление покрытия (давление азота $2 \cdot 10^{-1}$ Па)	4	190	110	1,5

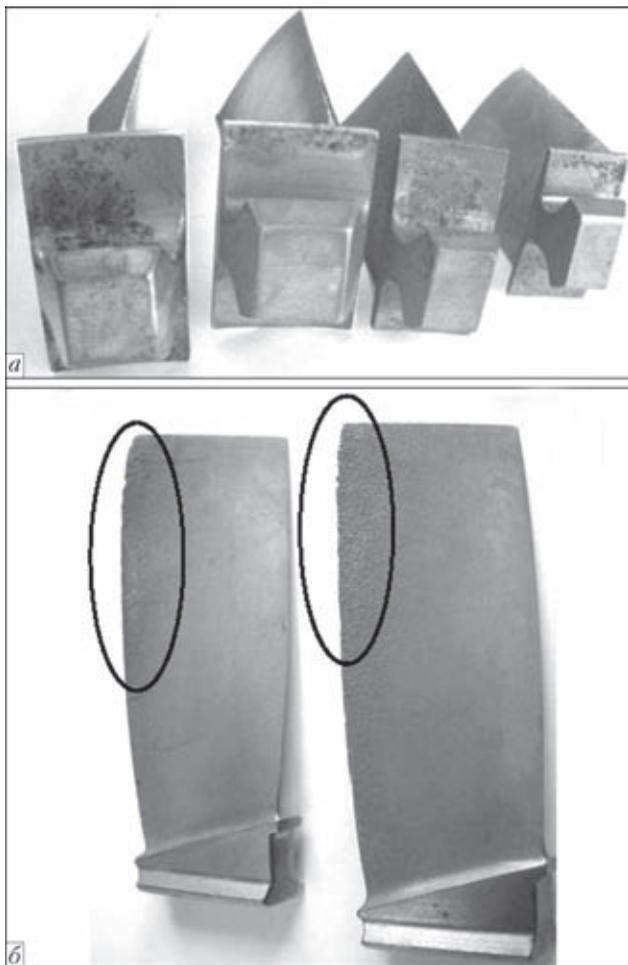


Рис. 1. Эксплуатационные дефекты лопаток ротора компрессора двигателя ТВ3-117: а – фреттинг-коррозия на замках лопаток; б – эрозионный износ на выходной кромке

дости приведены в табл. 3. Коррозионную стойкость покрытия определяли путем воздействия тонкораспыленной морской воды (морской туман) на перо лопатки при ее нагреве до 300, 400, 500 и 600 °С. Во время испытания покрытия (TiZr)N наблюдали рост солевых отложений в виде белых пятен, занимающих до 2 % общей площади лопатки. Окислительные коррозионные поражения не обнаружены ни со стороны хвостовика, ни на пере лопатки. При этом отсутствие цветов побежалости на лопатке с покрытием говорит о том, что покрытие (TiZr)N при воздействии химически

активной среды достаточно стойко к термоциклическим нагрузкам. Оценка солеобразных коррозионных поражений по десятибалльной шкале соответствует 6...7 баллам, окислительных – 10 баллам при указанных выше температурах испытания. Применение ионно-плазменного покрытия (TiZr)N по подсчетам дает повышение коррозионной стойкости хвостовика лопатки в 4...5 раз.

Микротвердость покрытия (TiZr)N на лопатках ротора компрессора и основного материала лопаток измеряли с помощью прибора ПМТ-3 при нагрузке 50 г в течение 7 с перед нанесением покрытия, после нанесения покрытия и каждого трехчасового отжига лопаток при температурах 300, 400, 500 и 600 °С как с покрытием, так и без него. Выбор времени отжига, равный трем часам, обусловлен тем, что контрольное время полета вертолета Ми-24, на котором устанавливаются двигатели ТВ3-117, в полной боекомплектности (в том числе взлет и посадка) составляет не менее двух часов. Температура воздуха в компрессорном узле двигателя ТВ3-117 составляет 300...400 °С, при этом возможно повышение рабочей температуры до 450 °С в области 12-й ступени компрессора. Лопатки ротора компрессора, устанавливаемые на двигатель, в процессе капитального ремонта проходят операцию упрочнения – виброполирование в бое шарошлифовальных кругов (размер боя – 5...10 мм), поэтому микротвердость (сплав ВТ-8) таких лопаток значительно выше, чем сплава без упрочнения, и приближается к значениям микротвердости того же сплава, но упрочненного способом винтовой экструзии: 4,1...4,28 ГПа (для температуры 700 °С) [11]. Измерение микротвердости после термоиспытаний лопаток как с покрытием, так и без него, показало тенденцию уменьшения микротвердости при увеличении температуры отжига (табл. 3).

Для сравнения приведем результаты исследований, приведенные в работах [12–14] для подобного покрытия TiN: микротвердость 21,2...27,4 ГПа, скорость эрозии 19...28 мг/мин.

Эрозионную стойкость покрытия (TiZr)N определяли по следующей методике. Перед испытани-

Таблица 3. Физико-технические показатели лопатки ротора компрессора с покрытием (числитель) (TiZr)N и без покрытия (знаменатель) (основа – сплав ВТ-8)

Показатель	Температура отжига, °С				
	без нагрева	300	400	500	600
Микротвердость, ГПа	34/6	32/5,5	25/4,5	24/3,2	5/3
Скорость эрозии $v_{эп}$, мг/мин	11/38	12/61	26/63	29/168	36/347
Среднее значение коррозионной стойкости ϕ , балл (max 10)	9/9	9/8	9/7	8/7	8/7

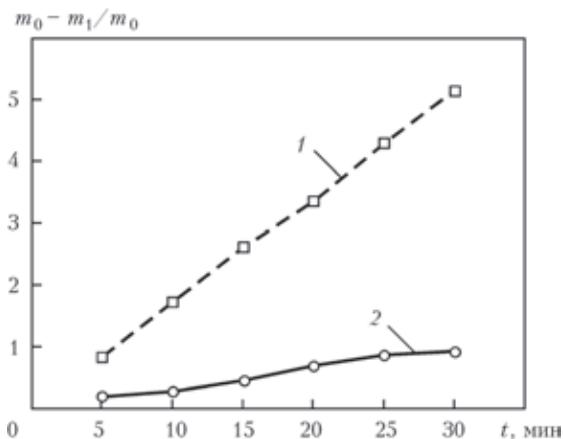


Рис. 2. Потеря массы лопатки при воздействии эрозионной среды: 1 – без покрытия; 2 – с покрытием (TiZr)N

ем и после него определяли массу лопатки взвешиванием с точностью до 0,001 г. Стендовые испытания проводили с использованием электрокорундового песка дисперсностью 100...300 мкм (14А F60), которым бомбардировали поверхность лопаток под давлением 0,3...0,35 МПа. При условии полета вертолета в районах песочных почв: дисперсность частиц засасываемого песка около 200 мкм и более, давление воздуха в области 12-й степени компрессора вертолетного двигателя ТВЗ-117 достигает 0,4 МПа (максимальное давление). Проводили опробование лопаток без покрытия и с покрытием (TiZr)N, до отжига и после него при указанных температурах (см. табл. 3). Скорость эрозии вычисляли по формуле [7]

$$v_{\text{эр}} = \frac{m_0 - m_1}{t} \quad (\text{мг/мин}),$$

где m_0 , m_1 – масса лопатки до и после испытания соответственно; t – время испытания.

Из табл. 3 видно, что скорость эрозии лопатки как без покрытия, так и с покрытием зависит от микротвердости материала лопатки или покрытия, а та, в свою очередь, от температуры в компрессорном узле при эксплуатации.

Согласно полученным результатам испытаний скорость эрозии лопатки с покрытием (TiZr)N в интервале рабочих температур до 300 °С снижается в 3,5...5 раз в отличие от лопатки без покрытия, о чем наглядно свидетельствует график (рис. 2). При этом микротвердость покрытия уменьшается незначительно.

В интервале рабочих температур 300...400 °С скорость эрозии лопатки с покрытием отличается от значений скорости эрозии лопатки без покрытия практически в то же число раз, что и при рабочих температурах до 300 °С. Это, в свою очередь, подтверждает предположение о том, что при таких температурах структура покрытия достаточно плотная и еще устойчива к механическим воздействиям пылевых частиц, попадающих в проточную часть компрессора, а первый слой вы-

полняет армирующие функции. Микротвердость покрытия снижается (см. табл. 3), однако, как отмечалось выше, это не влияет на его защитные свойства.

При повышении рабочих температур до 500 °С скорость эрозии лопатки без покрытия в отличие от лопатки с покрытием возрастает практически в шесть раз, поскольку предел прочности титанового сплава ВТ-8, из которого изготовлена лопатка ротора компрессора, сохраняет высокие значения до температуры 450 °С, а выше – резко падает. В этом случае, покрытие (TiZr)N выполняет еще и теплозащитные функции, т. е. частично предотвращает нагрев пера лопатки. В интервале температур 400...500 °С микротвердость покрытия так же, как и в интервале до 300 °С, уменьшается незначительно, что, в свою очередь, способствует сохранению прочностных характеристик.

Дальнейшее повышение рабочей температуры до 600 °С приводит к сильному эрозионному износу лопатки без покрытия, при этом отличие значений скорости эрозии лопатки без покрытия от лопатки с покрытием становится еще более значительным. Лопатка с покрытием (TiZr)N, установленная в ротор компрессора высоких температур, будет иметь стойкость к эрозионным воздействиям в 6...10 раз большую, нежели лопатка без покрытия. Однако микротвердость покрытия при работе лопатки при температурах более 600 °С резко падает до уровня значения микротвердости самого материала лопатки – титанового сплава ВТ-8, но при этом сохраняя высокую эрозионную стойкость к влиянию пылевой атмосферы в компрессоре.

На основании изложенных данных можно предположить взаимосвязь между следующими физико-техническими показателями покрытия (TiZr)N: скоростью эрозии и микротвердостью, установленными при различных температурах.

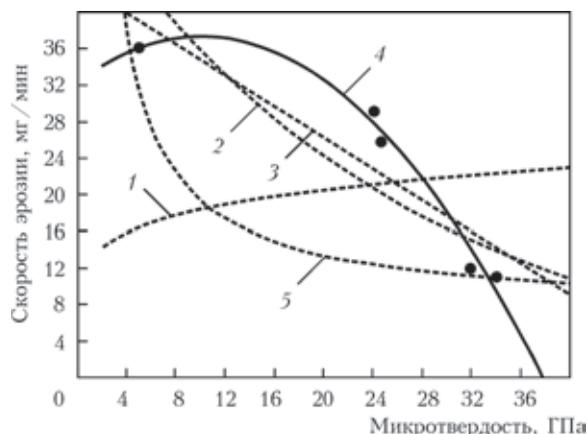


Рис. 3. Функции зависимости скорости эрозии покрытия (TiZr)N на лопатках от его микротвердости (черные точки – опытные значения скорости эрозии): 1 – степенная; 2 – показательная; 3 – линейная; 4 – парабола второго порядка; 5 – гиперболическая

Таблица 4. Функциональные зависимости и их анализ по опытным данным испытаний покрытия (TiZr)N

Аналитические показатели	Функция (общий вид/расчетная)				
	степенная $y(x) = a_0 \cdot x^{a_1} /$ $y(x) = 12,708x^{0,1587}$	показательная $y(x) = a_0 a_1^x /$ $y(x) = 53,3 \cdot 0,961^x$	линейная $y(x) = a_0 + a_1 x /$ $y(x) = 43,4232 - 0,8593x$	парабола второго порядка $y(x) = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 /$ $y(x) = 32,3546 + 0,9871x - 0,0488x^2$	гиперболическая $y(x) = a_0 + a_1 \frac{1}{x}$ $y(x) = 7,3 + \frac{12,6413}{x}$
S [8]	697,3	187,8	90,4	7,3	492,3
$\bar{\epsilon}$ [9]	57	25	22	5	56
η [9, 10]	0,31	1,11	0,9	0,99	1,5
r_1 [9, 10]	Подкорневое выражение <0	0,78	0,9	0,99	Подкорневое выражение <0

Данные испытаний компрессорных лопаток по этим показателям представлены на рис. 3. Для подтверждения предполагаемой связи дано математическое описание опытной кривой, которое сводится к определению формулы эмпирического уравнения методом наименьших квадратов (методом выравнивания).

Рассматривая пять основных функций зависимостей, которые наиболее часто встречаются при описании опытных кривых (табл. 4), и, решая системы нормальных уравнений для них, получили функциональные зависимости, которые с большей или меньшей степенью точности описывают поле экспериментальных данных. Сравнивая значения суммы отклонений $S_1 \dots S_5$, можно сделать вывод, что опытную кривую лучше всего описать квадратичной функцией второго порядка. Проверка уравнений моделей на адекватность осуществляется с помощью средней ошибки аппроксимации $\bar{\epsilon}$, величина которой (менее 12 %) показывает, что модель адекватна. В частности, согласно данным табл. 4, об адекватности модели можно говорить только для модели, описываемой уравнением параболы второго порядка, у которой средняя ошибка аппроксимации составляет 5 %. Остальные расчетные модели неадекватно отражают предполагаемую зависимость между выбранными параметрами, т. е., применяя их, получаем значения скорости эрозии с большой погрешностью. Что же касается измерения тесноты связи при криволинейной зависимости, то здесь используется не линейный коэффициент корреляции, а корреляционное отношение η , формула которого универсальна при любой форме зависимости (табл. 4). Теснота связи выбранных признаков оценивалась по шкале Чеддока: $0,1 < \eta < 0,3$: слабая; $0,3 < \eta < 0,5$: умеренная; $0,5 < \eta < 0,7$: заметная; $0,7 < \eta < 0,9$: высокая; $0,9 < \eta < 1$: весьма высокая; $\eta > 1$: связь отсутствует.

В степенной функции присутствует умеренная связь между признаками, в показательной – связь

отсутствует, в линейной – высокая, в функции параболы второго порядка – весьма высокая, в гиперболической – отсутствует. Следовательно, подобранная функция параболы второго порядка отражает наиболее сильное влияние друг на друга таких технических показателей, как скорость эрозии и микротвердость покрытия.

Степень приближения расчетных данных к фактическим значениям эмпирического ряда показывает коэффициент точности выравнивания кривой r_1 (индекс корреляции), который должен быть больше 0,95. Индекс корреляции (табл. 4) является максимальным у параболы второго порядка ($r_1 = 0,99$) и больше 0,95, что подтверждает правильность ее выбора для описания связи двух физико-технических показателей, ее адекватность и высокую точность описания результатов испытаний покрытия.

Расчетные значения (табл. 4) показывают, что зависимость скорости эрозии от микротвердости покрытия довольно точно можно описать с помощью параболы второго порядка.

Итак, согласно вышеизложенному при использовании лопатки с предложенным двухслойным покрытием (TiZr)N в узле компрессора авиационного двигателя можно избежать различных часто встречающихся эксплуатационных дефектов. При эрозионном воздействии на лопатку первый слой работает как армирующий элемент, который предотвращает появление микротрещин, сколов и задиров на покрытии в целом. А второй слой покрытия, благодаря плотности и высокой микротвердости, защищает лопатку от ударных нагрузок со стороны абразивных частиц и имеет улучшенное сопротивление фреттинг-коррозии. Экспериментальные данные показали, что даже при работе на повышенных температурах до 600 °С, эрозионная стойкость лопатки при использовании покрытия (TiZr)N возрастает практически в 10 раз. А стойкость лопатки к коррозионным повреждениям независимо от температуры эксплуатации



повышается в 4...5 раз по сравнению с лопаткой без покрытия.

Теоретически выведенная функция (парабола второго порядка) на основании практических результатов определяет зависимость скорости эрозии двухслойного покрытия (TiZr)N от его микротвердости, отражает тесную взаимосвязь выбранных параметров, достаточно хорошо коррелирует (индекс корреляции 0,99) с опытными значениями, что, в свою очередь, позволяет использовать данную модель при разработке деталей и узлов, проектируемых для условий эксплуатации, подобным вышеописанным.

1. Максимов Н. А., Секистов В. А. Двигатели самолетов и вертолетов. Основы устройства и летной эксплуатации. – М.: Воениздат, 1977. – 343 с.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Ч. 1 / В. А. Богуслаев, Ф. М. Муравченко, П. Д. Жеманюк и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
3. Ржавин Ю. А. Осевые и центробежные компрессоры двигателей летательных аппаратов. – М.: Изд-во Моск. авиац. ин-та, 1995. – 243 с.
4. Душкин А. М., Процин А. Б. Защитные покрытия на стальных лопатках компрессора // Авиац. пром-сть. – 1988. – № 7. – С. 13–15.

5. Болдов В. В., Кордит Е. А., Якубович Е. А. Исследование свойств вакуумно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Там же. – 1987. – № 9. – С. 61–62.
6. Износостойкие покрытия из нитридов циркония для легких сплавов / В. А. Богомолов, Г. Б. Ларина, Б. А. Полянин, Ф. М. Хлыстов // Там же. – 1988. – № 3. – С. 51–53.
7. Методическое руководство по анализам и испытаниям авиационных материалов и деталей: Вып. № 960. – М.: НИИ эксплуатации и ремонта авиатехники ВВС, 1960. – 370 с.
8. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений. – М.: Физматгиз, 1958. – 338 с.
9. Лисьев В. П. Теория вероятностей и математическая статистика. – М.: МГУ статистики, экономики и информатики, 2006. – 199 с.
10. Шанченко Н. И. Лекции по эконометрике. – Ульяновск: Ульян. гос. технол. ун-т, 2008. – 139 с.
11. Технологические особенности изготовления лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов с применением винтовой экструзии / А. Я. Качан, А. В. Овчинников, Д. В. Павленко и др. // Вестн. двигателестроения. – 2012. – № 1. – С. 92–97.
12. Хворостухин Л. А., Ножницкий Ю. А., Болманенков А. Е. Исследование эрозионной прочности ионно-плазменного покрытия из нитрида титана // Авиац. пром-сть. – 1988. – № 6. – С. 59–61.
13. Болдов В. В., Кордит Е. А., Якубович Е. А. Исследование свойств вакуумно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Там же. – 1987. – № 9. – С. 61–62.
14. Физико-механические характеристики покрытий, полученных методом ионной бомбардировки / И. В. Милосердов, В. Л. Паперный, Р. В. Макаров и др. // Там же. – 1989. – № 12. – С. 39–40.

Поступила в редакцию 27.03.2013

НОВАЯ КНИГА

Ищенко А. Я., Лабур Т. М. Сварка современных конструкций из алюминиевых сплавов. — Киев: Наук. думка, 2013. — 416 с.

В монографии рассмотрены системы легирования алюминиевых сплавов, классификация полуфабрикатов и сварочных материалов, а также их структура и свойства. Представлены сведения об основных способах сварки плавлением и в твердой фазе. Приведены результаты изучения процесса разупрочнения металла при сварочном нагреве, а также информация о свойствах сварных соединений при действии статических и циклических нагрузок, характере разрушения и коррозионной стойкости.

Для научных работников, инженеров металлообрабатывающих и машиностроительных предприятий, применяющих алюминиевые сплавы, а также преподавателей и студентов высших учебных заведений соответствующих специальностей.

